

強磁場下でのレーザープラズマ実験による 実験室天文学研究

米田仁紀 研究室 1633033 小沼杏奈

1. 序論

近年、実験室で宇宙現象の模擬実験をすることが盛んにおこなわれるようになってきている。その中で高出力レーザーによる無衝突衝撃波の生成実験も実験が大掛かりに行われるようになり、無衝突衝撃波近傍の電磁場や粒子分布関数が実験で直接計測され、高エネルギー宇宙線の起源にせまると期待されている[1]。この起源とも考えられているフェルミ加速理論[2]では、無衝突衝撃波面での磁場の働きも重要となってくる。これを実験室中にて再現するためには、気体の平均自由行程と磁場による旋回運動のラーモア半径の大小関係を、宇宙での模擬に適した値にする必要があり、背景ガス圧、レーザー強度、磁場強度などのパラメータを最適化する必要がある。現在の kJ レベルのレーザーを使った場合、ある程度温度を保ちながら膨張し衝突する実験サイズを考えると数 cm で、粒子間衝突の影響を低減させるためには数 Torr 以下の背景ガス圧が必要になる。そこで、十分に磁場が粒子軌道に影響を及ぼすためには数 Tesla 以上の磁場強度が必要になる。しかし、実験上は新たな困難を生み出すことになっている。それは、このような強磁場を発生させるためには、kA 以上の大電流が必要で、インダクタンスの関係から 10kV 以上の電界がコイル部に印加されることになる。ところが、設定ガス圧、システムの大きさは、いわゆる放電のパッシェンミニマムと呼ばれる状況であり、数百 V 程度の電圧でも放電が起きる状況にある。

そこで本研究では、このような低気圧雰囲気下で数 Tesla のパルス磁場を発生させる手法を開発し、それを用いて大型レーザー施設での実験室天文学実験を行うことを目的とした。

2. 超高エネルギー宇宙線の起源

宇宙空間を高エネルギーで飛び交う荷電粒子のことを宇宙線といい、1912年にヘスにより発見された[3]。宇宙線は地球にも常時飛来してきているが、そのエネルギーが高くなるにつれて到来する頻度は極端に低くなることが知られている。この宇宙線のエネルギーについて、1965年に3Kマイクロ波放射が発見されたこと[4]で、地球で観測される宇宙線のエネルギースペクトルには上限があると予測されていた。それは、この放射が宇宙に充満しているならば、たとえ 10^{20} eV を超える宇宙線が宇宙空間に存在したとしてもマイクロ波放射と光子との衝突によるエネルギー損失が避けられないためである。しかし、1990年代前半には 10^{20} eV を超える宇宙線が相次いで観測され、世界的に注目を集めた。図1は、明野広域シャワーアレイ実験 (AGASA) により観測された超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトルを示している [5]。

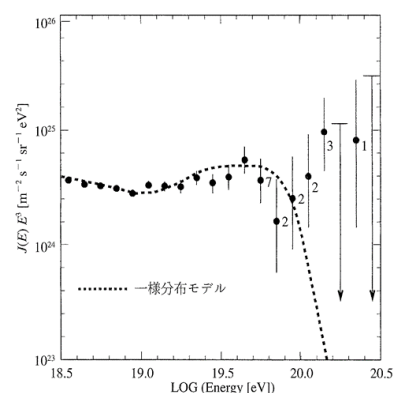


図1 AGASA で観測された超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル

図中の破線は宇宙線源が宇宙空間に一様に分布している場合に期待されるエネルギースペクトル

ルに実験誤差を含めたもので、このモデルにおいては 10^{20}eV 以上の宇宙線はほとんど期待できないことがわかる。観測されたエネルギースペクトルの特徴的な点として、 10^{19}eV 以上でエネルギースペクトルの勾配が緩やかになっていることと、 10^{20}eV 以上まで比較的滑らかに伸びていることが挙げられる。 10^{19}eV を超える宇宙線の銀河磁場中でのラーモア半径は銀河円盤の半径程度であるため、もし銀河系内起源であれば、その到来方向分布は銀河面との強い相関を示すことになる。しかしそのような異方性は観測されておらず極めて等方的であるため、宇宙線が銀河系内起源から銀河系外起源への変化を表すものとして解釈されている[5]。

10^{20}eV の宇宙線の源までの距離は、宇宙背景放射の光子との相互作用によるエネルギー損失のために50Mpc(約1.5億光年)は超えないと推定されている。これは宇宙論的なスケールでは比較的近傍にその起源があることが期待される。銀河系近傍での天体の分布は一樣ではなく宇宙の大規模構造を反映しているため、もし宇宙線が天体で加速されているならば、その到来方向分布には近傍での銀河分布との相関が表れるはずである。図2は 10^{20}eV 以上の超高エネルギー宇宙線の到来方向を銀河座標で示したものである。

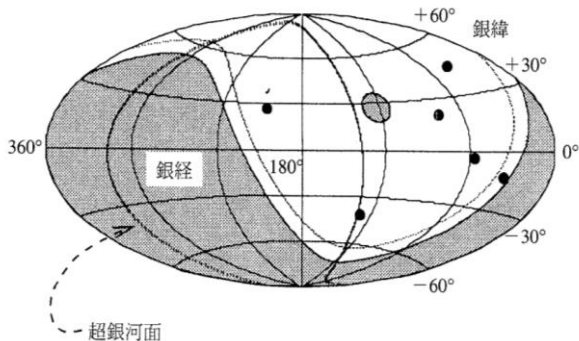


図2 10^{20}eV 以上の超高エネルギー宇宙線の到来方向[5]

塗りつぶされた領域はAGASAでは観測できない領域を示している。この図から、50Mpc以内では宇宙線を 10^{20}eV 以上にエネルギー領域まで加速

できそうな活動的な天体は存在していないことがわかる。このことから、超高エネルギー宇宙線の起源は、特定の活動的な天体による加速ではなく、宇宙初期に生じた位相欠陥や準安定な超重量粒子からの二次粒子ではないかなど、様々なモデルや理論が提唱され議論を呼び起こしたが、未だその起源は解明されていない。

提唱された加速機構における理論の中で、現在最も有力な候補として考えられているのは、無衝突衝撃波でのフェルミ加速(FA)理論である[6]。宇宙空間では平均自由行程が長いため、衝撃波は形成されないと考えられてきた。しかし、観測技術の発展により、宇宙空間でも衝撃波が存在することが判明し、これを衝突由来ではない衝撃波として無衝突衝撃波と呼ぶのである。無衝突衝撃波は荷電粒子と電磁場の相互作用によって形成されるため、再現実験には磁場が必須となる。

磁場フェルミ加速理論によると、衝撃波近傍で運動する粒子は磁場の波の影響を受けるが、磁場に揺らぎがあると磁気鏡の要領で粒子は散乱される。宇宙線粒子は散乱体である磁場と上流で正面衝突によりエネルギーを増し、下流では追突によりエネルギーを失う。しかし散乱体の速度は上流の方が下流よりも速いため、上流と下流の間を一往復すると必ずエネルギーを得ることになる。実際には大部分の粒子(図3中の粒子B)は背景プラズマの流れにのって下流方向へ流されエネルギーを得ることはないが、一部の粒子(図3中のA)が衝撃波面を何度も横切り加速されるのである[7]。

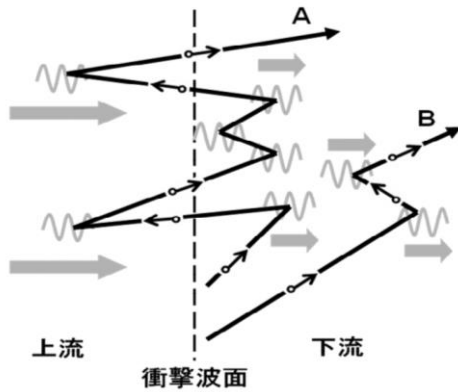


図3 衝撃波粒子加速機構(FA)の模式図[7]

フェルミ加速の最も重要な未解決問題の一つは粒子の「注入問題」である。被加速粒子は、衝撃波面を自由に横切るに十分なエネルギーまで一旦加速されていなければならない。しかし、この予備的加速の機構は衝撃波近傍での複雑なプラズマ過程に支配されているため、理解は困難を極めている。そのため、衝撃波で加速される粒子の総量（注入効率）は、シミュレーションによるモデルの提唱は進められているものの観測的に推定するしか方法がないというのが現状である。最近の観測結果は個々には非線形モデルを支持するという主張が多いが、それら個々の結論をつき合わせると矛盾点も見えてきており、現在のところ確立したとは言い難く解釈はなかなか決着しない[7]。

このように無衝突衝撃波でのフェルミ加速の研究は数値シミュレーションにほとんど制限されており、経験的検証は不十分であるといえる。また、観測の問題点として、現象における初期の相互作用を捉えることができないことが挙げられる。よって、これらの現象を実験室内で再現する実験室天文学実験は、超高エネルギー宇宙線の起源を理解するために非常に重要である。

3. 低気圧ガス中での磁場発生システム

課題となる放電を回避する手法として、電圧が印加されるコイル部を絶縁条件がいい 10^{-4} Torr 程

度の高真空を保てるようにし、薄いプラスチック膜でこの高真空状態と実験背景となる低気圧状態を分ける装置を製作した。装置の概要図を図4に示す。磁場電流は、初期電気エネルギー貯蔵のコンデンサ部からレーザートリガースイッチを通し1列あたり5kAで20kVの電気パルスが発生させ、それを導波路部で並列に繋ぎ変えることで20kAの電流を駆動できるようにした。大型レーザー実験では、半径1m弱の低気圧ガスを封入したターゲットチャンバー内に、この電気パルスを伝播させる必要があるので、導波路は2m程度のステンレス製ダクト内にいれ、中をターボポンプで高真空状態にした。磁場発生部とプラズマ生成ターゲットは、数mm以下に配置する必要がある。そのため、この金属ダクトの先に、 $100\mu\text{m}$ 厚程度の熱収縮性誘電体チューブで導波路を囲い高真空状態を保てる構造とした。これにより単一コイルで2 Torr という最も厳しいとされる低気圧雰囲気ガス中にて4.9 Teslaの磁場発生に成功した。

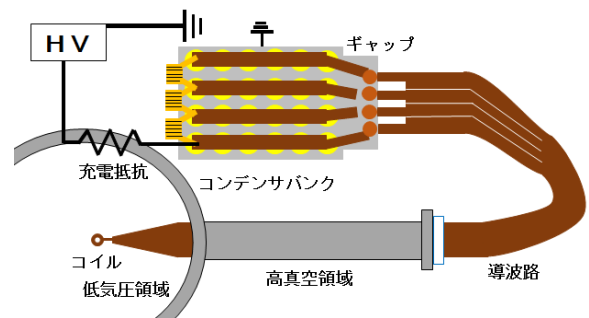


図4 磁場発生装置の概要図

磁化プラズマの生成実験では、当然プラズマ膨張部に様な磁場を発生させる必要がある。そのため次に、コイルをヘルムホルツ型にするために、導波路からの給電路を直列になるように2つのコイルを設置し、その双方を前述の熱収縮チューブでシールドできる構造にした。この結果、ピーク磁場強度1.3 Tesla、均一度30%の磁場を発生させることに成功した。図5に測定した磁場強度の分布を示した。

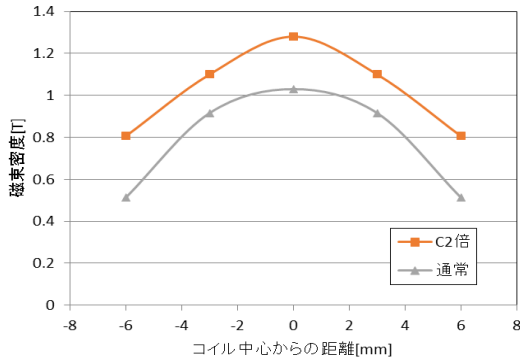


図 5 磁場強度の分布

4. 高出力レーザーによる無衝突衝撃波の生成

作製した磁場発生装置を用いて、磁化プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波の生成実験を、大阪大学の大型レーザー装置である激光XIII号を用い、青山学院大学、大阪大学、九州大学などとの共同研究実験として行った。実験方法としては、真空チャンバーの内部を 5Torr の窒素ガスで満たし、アルミターゲットターゲットに kJ 級のレーザーを照射した際に発生する輻射により、輻射電離過程を使って電離させ背景プラズマとする。ターゲットのアルミはレーザーアブレーションにより高速プラズマ流となり、あらかじめ印加してある磁場中を膨張する。この時、前述のレーザー半径対平均自由工程比が 1 より十分に小さければ、膨張するプラズマは磁化プラズマとなり、無衝突衝撃波になる。図 6 に概要図を示す。

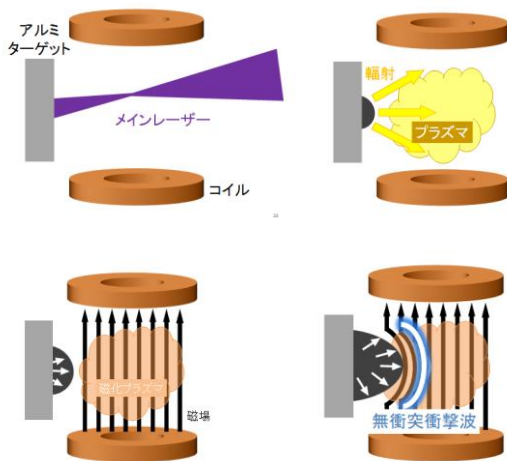


図 6 無衝突衝撃波の生成

無衝突衝撃波の観測として、別途用意された Q スイッチパルスレーザーを用いたシャドウグラフでプラズマ膨張の様子を、衝突部の電子温度、密度をトムソン散乱分光計測で、プラズマ自体の温度を自発光による輻射温度計測により行った。測定系の概要を図 7 に示している。実験はチャンバーの中央 (以下、Target Chamber Center の略で TCC という) で行われ、図 7 では TCC になるコイルの位置を輪で示してある。

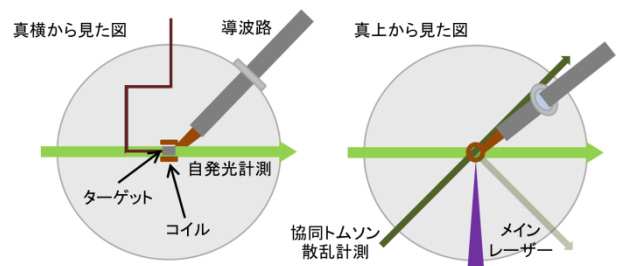


図 7 計測系の概要

コイルの設置姿勢の要求で、上述の観測系全てに干渉せず、かつメインレーザーに対して 15 度傾けた姿勢で保持しなければならない。そこで 3DCAD 図面にて測定系との整合を取りながら設計を行い、設置治具を作製した。治具の設計図及び作製した治具を図 8 に示した。

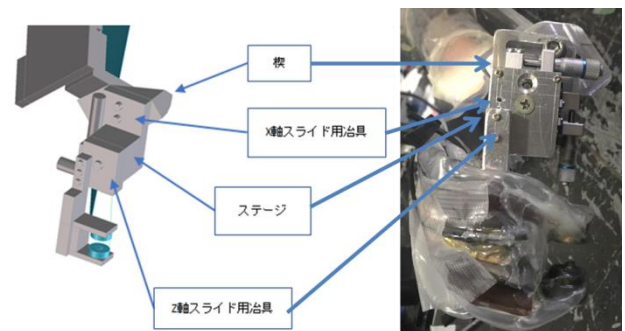


図 8 治具の設計イメージと作製した治具

作製した治具の有用性を確かめるために、事前実験にて実際に治具を付けて導入した際のコイルの姿勢と、3DCAD 上で想定されるコイルの姿勢を比較した。この結果。作製した治具は理想的なコ

イル姿勢を保持できることが確認された。図 9 に比較画像を示した。

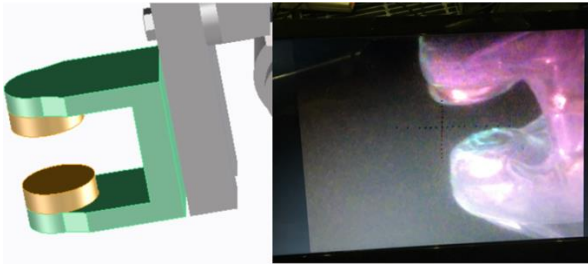


図 9 CAD と実際に撮影した映像との比較

作製した実験系を用いて実際に実験を行おうとしたところ、先端のガスが抜けきらず、放電のため磁場のピーク強度を設計より下げた 0.5 Tesla として行うこととなった。ターゲットにメインレーザーとなる kJ レーザーを照射した際に、ターゲットの前後とも高速のプラズマを吹き出すため、コイル部の保護が必要となる。このため、コイルの真空を保持するチューブに接着性の樹脂の塗布を行った。kJ レーザーのショット後、この塗布した樹脂が部分的に剥がれ、コイル部がリークしていることが判明した。

実験としては、その後、磁場の影響を調べるために、このコイル装置を導入したまま kJ レーザーのショットを行った。その後コイル部を引き上げ、目視による観測をしたところ、コイル部のチューブ全体が真っ黒に変色していることが分かった。コイル部分のチューブの様子を図 10 に示す。黒い成分は、微粒子化されたアルミと考えられるが、プラスチックフィルム表面につく限りは、コイル動作には影響を及ぼすことはないと思われる。実際に、磁場のあるなしでプラズマ膨張の計測データの違いを見たが、残念ながら大きな差はないものであった。これは、他のショットで得られた膨張プラズマの温度 35eV と磁場強度 0.5 Tesla から考えると、磁場圧力が熱圧力の 10%程度でしかなく、パラメータ的には予測の領域であった。

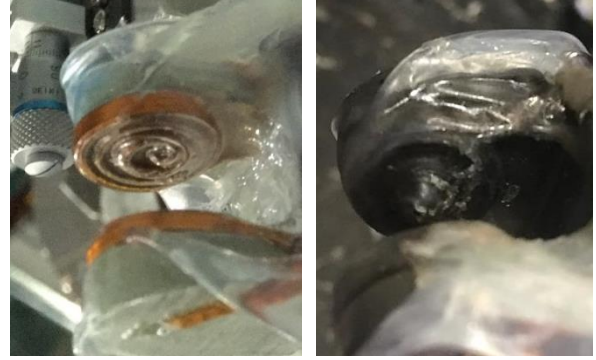


図 10 ショット前後のコイル部の様子

今回新たに得られた知見として、kJ レーザーショット時にのみ片側のコイル中央にて貫通穴が生じることがわかった。これは、kJ レーザー照射以外の試験時には起きないことであり、このことからレーザープラズマ実験における磁場の影響は予想以上に大きかったといえる。破損が生じた原因として、核融合の研究にてよく知られる磁気ミラー系 (図 11) の損失と同様の現象が生じたのではないかと推察する[8]。磁気ミラー系では、二つのコイルによる磁力線でプラズマを閉じ込めるが、ある条件で強磁場部からプラズマが抜けてしまうことがよく知られている。本実験においても、kJ レーザーにより生じた高温のアブレーションプラズマが、磁力線に沿って運動し、最終的にミラー磁場の端部のようにコイル中心の磁力線が集中している部分に衝突し、結果保護チューブの破壊が起きたと考えられる。

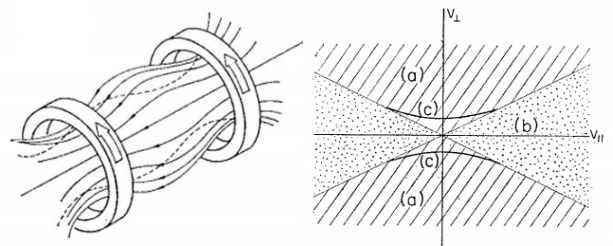


図 11 磁気ミラー系の概要図[8]

磁気ミラー系では損失は両端で生じるのに対し、片側のみチューブが破損したのは、セットアップ上の都合でアルミターゲットがコイルに対し

完全な垂直ではないため、片側のコイルによりアブレーションプラズマが吹き付けられたためと考えられる。

5. まとめと今後の展望

本研究では、フェルミ加速理論の実証のための無衝突衝撃波の生成を目指し、低気圧ガス中での磁場発生装置の作製と、それを用いた無衝突衝撃波生成実験を行った。磁場発生装置の作製では、コイル部を別途フレキシブルな誘電体のチューブにより囲うことで、コイル末端部まで高真空状態を保てる構造とすることで絶縁破壊の問題を解決し、2Torr という低気圧ガス中にて 4.9Tesla の磁場発生に成功した。更に実験に必要な様な磁場を得るためヘルムホルツ型コイルも作製し、均一度 30%、ピーク強度 1.3Tesla の磁場発生に成功した。

作製した磁場発生装置を用いて、磁化プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波の生成実験を、大阪大学の大型レーザー装置である激光XII号を用いて行った。実験の結果コイルを覆うチューブに破損が生じてしまったが、磁場を印加したレーザー照射実験を行うことができた。

今後の展望として、要求値通りの磁場の生成が出来るよう治具の設計を見直し、かつ磁場の繰り返し印加を可能にするための対策を行う。

参考文献

- [1] D. B. Schaeffer, W. Fox, D. Haberberger, G. Fiksel, A. Bhattacharjee, D. H. Barnak, S. X. Hu, and K. Germaschewski, *Physical Review Letters* **119**, 025001 (2017).
- [2] R.D. Blandford and D. Eichler: *Phys. Rep.* **154** (1987)
- [3] V. F. Hess. "Über Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten." *Physikalische Zeitschrift*, 13:1084-1091, November (1912).
- [4] R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll and D. T. Wilkinson, "Cosmic Black-Body Radiation," *Astrophysics Journal* 142 (1965), 414.
- [5] 竹田成宏 宇宙線のエネルギースペクトルはどこまでのびるか 日本物理学会誌第 54 巻第 1 号 41-43 頁(1999)
- [6] R.D. Blandford and D. Eichler: *Phys. Rep.* 154 (1987) 1
- [7] 山崎了 銀河宇宙線の起源に迫る : 理論・観測研究の最近の進展 日本物理学会誌第 64 巻第 3 号 196-200 頁(2009)
- [8] 河辺隆也, 日本物理学会誌 **36**, 3, 206(1981)